

黑木相思与尾叶桉苗期氮素传递的研究

廖绍波, 陆俊锬*, 江业根, 王胜坤

(中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520)

摘要:以尾叶桉、黑木相思苗木混栽为研究对象,采用¹⁵N 土壤和叶片标记法,在温室盆栽下研究 2 种植物间在根系完全隔离、部分隔离及无隔离处理下的生长变化及 N 素传递。结果表明:黑木相思的苗高、地径及生物量等生长指标随着根系隔离的减少而逐渐降低;相反,尾叶桉在根系无隔离处理下,其生长指标都要显著高于根系完全隔离处理,结果表明尾叶桉具有强大的养分吸收能力,混栽条件下会抑制黑木相思的生长。在¹⁵N 土壤或叶片标记下,尾叶桉在根系部分隔离、无隔离下的总¹⁵N 含量显著高于完全隔离处理(5.0 和 59.6 倍);在土壤标记下,根系无隔离处理的黑木相思总¹⁵N 含量显著低于完全隔离、部分隔离处理,而在叶片标记下的完全隔离黑木相思,其总¹⁵N 含量显著低于其余 2 种处理。无论土壤或是叶片标记,黑木相思都能将 N 素传递至相邻尾叶桉,其 N 素传递率、传递量随着根系隔离的减少而提高。研究结果表明尾叶桉、黑木相思间能通过土壤渗透等方式传递 N 素,为桉树、相思的混交模式提供可靠的理论依据。

关键词:黑木相思;尾叶桉;氮素传递;生长表现

中图分类号:S723.1

文献标识码:A

Study on Nitrogen Transfer between *Acacia melanoxylon* and *Eucalyptus urophylla* Seedlings

LIAO Shao-bo, LU Jun-kun, JIANG Ye-gen, WANG Sheng-kun

(Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: Nitrogen (N) can be transferred between plants. In order to remain N balance between plants and fertility of soil, mixture of N₂-fixing plants and non-N₂-fixing plants provide good system for forestry. To investigate whether the root isolation (e. g. complete isolation, partial isolation and no isolation) could account for the mixed *Acacia melanoxylon* and *Eucalyptus urophylla* growth response and N transfer, the authors assessed N transfer by ¹⁵N-soil/leaf-label method in a pot study. The height, diameter and biomass of 7-month-old *A. melanoxylon* were lower when the root isolation reducing. By contrast, the growth index were significantly higher in *E. urophylla* grown under no isolation than that of grown in complete isolation, indicating *E. urophylla* owns stronger absorbing capacity than *A. melanoxylon*. In both ¹⁵N-soil/leaf-label treatments, the total ¹⁵N content of *E. urophylla* was significantly higher (5.0 and 59.6 times) in partial or no isolation than in complete isolation respectively. In ¹⁵N-soil-label status, the total ¹⁵N content in *A. melanoxylon* grown by no isolation were significantly lower than that of the other two isolation treatments. Nevertheless, by ¹⁵N-leaf-label, *A. melanoxylon* in complete isolation had significantly lower total ¹⁵N content than the other isolation treatments. Irrespective of the labeled status, *A. melanoxylon* always trans-

收稿日期:2015-05-08

基金项目:国家林业公益性行业科研专项“功能微生物在低碳林业中的应用研究”(201004075)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(RITFYWZX201207)。

作者简介:廖绍波(1957—),男,高级工程师,主要从事土壤农化、观赏园艺与景观工程研究。

* 通讯作者: E-mail: lujunk@163.com.

ferred the N to neighbor *E. urophylla*. The percentage and amount of N transfer increased with the root isolation reducing.

Key words: *Acacia melanoxylon*; *Eucalytups urophylla*; nitrogen transfer; growth performance

植物间的N素传递对生态系统的营养平衡具有特殊的意义^[1-3],其传递方式主要包括土壤渗透、菌丝联网及寄生器官连接等^[2-6],而N素传递方式在混交林中极为常见^[1,3,7]。固N树种能与土壤中的根瘤菌共生固N,为宿主提供充足的N源,还能将固定的N素以根系分泌物、衰老组织等形式通过土壤传递至相邻的植物。为充分发挥N素传递的促生优势,林学工作者已普遍采用非固N树种与固N树种混交种植模式,对混交机理的研究大多数集中在土壤养分含量等方面^[7-9],对于树种间的N传递研究较少。

黑木相思(*Acacia melanoxylon* R. Br.)于上世纪90年代在我国引种成功,因其美丽木纹、优良材质,在家具及板材上具有极高的应用价值^[14]。随着市场需求量的增大,种植规模不断扩大,与之相应的研究也相继展开^[15-16]。黑木相思属豆科植物,能与土壤中根瘤菌共生固N^[16],提高土壤N素水平,改善土壤的肥力。

桉树作为我国南方重要的工业用材树种,在我国木材保障战略中具有重要地位^[10]。然而,桉树人工林对生态环境的影响引起了广泛的重视,特别是桉树在生长过程中会影响林地的水源成分^[11]、降低土壤肥力^[12]、降低林下物种多样性^[13]等。因此大面积的桉树人工林急需进行改造更新,目前生产上广泛采用相思类树种如厚荚相思(*Acacia crassicarpa* A. Cunn. ex Benth.)、马占相思(*Acacia mangium* Willd.)等固N树种与桉树进行混交种植^[9],一定程度上降低了大面积桉树纯林的风险,并能提高林木的生产力。目前对桉树与相思混交林的机理研究较少^[7,9],至今还未见到研究桉树与相思之间N素传递的相关报道。

本研究开展尾叶桉(*Eucalytups urophylla* S. T. Blakely)与黑木相思(*Acacia melanoxylon* R. Br.)混合种植的盆栽试验,设立根系完全隔离、根系部分隔离及根系无隔离等3种处理,应用¹⁵N标记土壤、叶片,研究尾叶桉与黑木相思在根系隔离处理下的生长变化规律及两树种间N转移关系和转移途径,为桉树人工林改造及尾叶桉-黑木相思混交模式提供理论依据与技术支持。

1 材料与方法

1.1 培养土壤与试验用苗木

1.1.1 培养土壤 本试验所用尾叶桉和黑木相思幼苗的培养均采用赤红壤,取自中国林业科学研究院热带林业研究所后山20~40 cm土壤(23°11' N, 113°23' E)。土壤经自然风干后过孔径5 mm土筛备用。土壤的理化指标为:pH值4.45,有机质5.16 g·kg⁻¹,全N 0.30 g·kg⁻¹,全P 0.15 g·kg⁻¹,全K 7.19 g·kg⁻¹。

1.1.2 试验用幼苗 试验用尾叶桉和黑木相思幼苗为热带林业研究所林木组培与转基因研究中心提供的组培苗。组培苗缓苗两周后每树种选择生长健康、长势相近的苗木作为试验用苗。

1.2 试验设计

1.2.1 根系隔离处理 试验在中国林业科学研究院热带林业研究所温室进行。将尾叶桉与黑木相思2种幼苗移植至同一方形密封塑料盆(50 cm×40 cm×20 cm),种植间隔为20 cm,盆中装满上述土壤。根据试验设计,设置3个根系隔离处理,分别是根系完全隔离处理,在2种树种间插入双层塑料薄膜,使幼苗间的根系、土壤完全隔离;根系部分隔离处理,在2种幼苗间插入2 mm孔径的双层尼龙网,使幼苗间的细根可穿过,阻碍较粗的根穿过;根系无隔离处理,2种幼苗间无任何的阻隔,促使幼苗间的根系自由生长。每个处理3盆,4次重复。在苗木培育过程中,每周浇水2次,保持盆中土壤维持在田间持水量左右,每种幼苗每月施加150 mL的霍格兰营养液,常规培育6个月。

1.2.2 ¹⁵N标记处理 设置¹⁵N的土壤标记、叶片标记以及无¹⁵N标记3种处理。在上述处理培育6个月后,土壤标记在黑木相思一侧施入5 mL 0.15% ¹⁵NH₄(SO₄)₂(≈10.0 atom% ¹⁵N)溶液;叶片标记将黑木相思的叶柄插入含有1.0 mL 0.15% ¹⁵NH₄(SO₄)₂(≈99.6 atom% ¹⁵N)溶液的1.5 mL离心管中,共标记3片叶柄,具体标记方法见文献[6]。每处理4个重复,标记期为4周。所有苗木在标记后4周收获。

1.3 参数测定

1.3.1 苗木生长指标测定 试验期结束时,将各种

苗木从土壤中取出,将根系的土壤冲洗干净,分别测定和记录苗高、地径等生长指标。

1.3.2 苗木生物量测定 按苗木的根、茎、叶(黑木相思为叶柄)等分开,在70℃温度条件下烘干至恒质量,分别测定每样株各部的干质量。

1.3.3 土壤、苗木全N及¹⁵N原子丰度测定 收集每种苗木生长的0~10 cm表层土壤(以苗木为中心,半径5 cm划圆取样),混合制样供分析。植株的根、茎、叶等样品各自烘干后粉碎,经过100目筛选成供试样品。样品的全N采用凯氏法测定,¹⁵N原子丰度利用DELTA V Advantage同位素质谱仪(Thermo Fisher Scientific, Inc., USA)进行测定。

1.4 数据分析

1.4.1 N传递率及传递量的计算 植物样品所获¹⁵N原子丰度和全N等根据以下公式进行计算,公式参考自文献[3]:

$$E_p = R_a - R_b \quad (1)$$

$$C = E_p(TN/E_N) \quad (2)$$

$$NP = C_r(100/(C_r + C_d)) \quad (3)$$

$$NC = NP(TN/(100 - NP)) \quad (4)$$

式(1)中的 E_p 为植物的原子百分超, R_a 为标记植物的原子丰度, R_b 为未标记植物的原子丰度;式(2)中的 C 为¹⁵N含量, TN 为全N, E_N 为标记物的原子百分超,土壤标记是10%,叶片标记是99.6%;式

(3)中的 NP 为N传递率, C_r 为接收植物尾叶桉的¹⁵N含量, C_d 为标记植物黑木相思的¹⁵N含量;式(4)中的 NC 为N传递量。

1.4.2 差异分析和检验 利用SPSS 18.0对各种根系隔离处理的同种苗木的各种生长指标、全N、¹⁵N原子百分超、¹⁵N含量,以及各处理的N传递率、传递量进行单因素方差分析(ANOVA),若 F 值差异显著,再进行LSD多重比较。关于同一处理下2种苗木的各项指标差异用 t -检验进行比较。

2 结果与分析

2.1 不同隔离处理下苗木土壤的N素变化

不同根系隔离下尾叶桉、黑木相思幼苗的土壤全N、¹⁵N原子丰度结果见表1。结果表明,在土壤标记或叶片标记的情况下,完全隔离处理下2树种的土壤全N浓度要显著高于部分隔离、无隔离处理($P < 0.05$),其中土壤标记下的尾叶桉土壤全N在完全隔离下比部分隔离、无隔离处理增加26.7%,根系完全隔离下的黑木相思土壤全N较部分隔离、无隔离处理分别增加24.1%和33.3%;而叶片标记下的完全隔离尾叶桉土壤全N较部分隔离处理、无隔离处理增加33.3%,黑木相思土壤的全N较部分隔离处理、无隔离处理分别增加35.7%和40.7%。

表1 不同根系隔离处理下尾叶桉-黑木相思土壤的全N及¹⁵N原子丰度

处理	尾叶桉		黑木相思	
	全N/(mg·g ⁻¹)	¹⁵ N原子丰度/%	全N/(mg·g ⁻¹)	¹⁵ N原子丰度/%
土壤标记				
根系完全隔离	0.38 ± 0.02 a,x	0.37 ± 0.00 a,y	0.36 ± 0.04 a,x	0.43 ± 0.06 a,x
根系部分隔离	0.30 ± 0.02 b,x	0.37 ± 0.00 a,y	0.29 ± 0.05 b,x	0.46 ± 0.06 a,x
根系无隔离	0.30 ± 0.03 b,x	0.38 ± 0.00 a,y	0.27 ± 0.02 b,x	0.53 ± 0.09 a,x
叶片标记				
根系完全隔离	0.36 ± 0.06 a,x	0.37 ± 0.00 a,y	0.38 ± 0.01 a,x	0.39 ± 0.00 a,x
根系部分隔离	0.27 ± 0.03 b,x	0.37 ± 0.00 a,y	0.28 ± 0.03 b,x	0.40 ± 0.00 a,x
根系无隔离	0.27 ± 0.03 b,x	0.37 ± 0.01 a,y	0.27 ± 0.03 b,x	0.40 ± 0.00 a,x

注:数值以平均数±标准误表示($n=4$)。每数值后面的不同字母分别表示各标记方法内同种植物不同隔离处理之间(a, b, c),或同一处理中2种植物之间(x, y)差异显著($P < 0.05$)。下同。

黑木相思在2种¹⁵N标记条件下,其土壤¹⁵N原子丰度在各种根系隔离状态下都要显著高于同处理的尾叶桉($P < 0.05$);其中,在土壤标记下高了16.2%~39.5%,在叶片标记下高了5.4%~8.1%。

2.2 各隔离处理对苗木生长的影响

苗木的生长情况见表2和图1。在土壤或叶片标记方法下,尾叶桉在无隔离处理下的苗高、地径以及生物量等指标都要显著高于其完全隔离处理(P

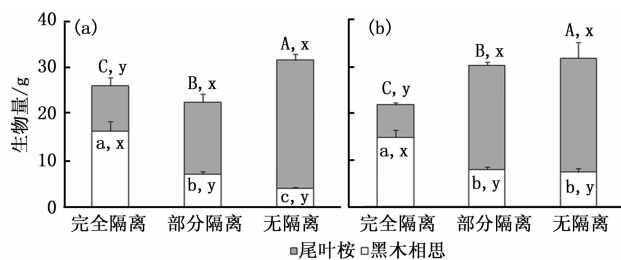
< 0.05),其中土壤标记下各指标分别增加了21.4%,18.5%和182.7%,叶片标记下分别增加了52.7%,34.5%和250.9%;尾叶桉在无隔离处理下的生物量要显著高于其部分隔离处理($P < 0.05$),土壤标记和叶片标记下分别增加了77.3%和9.1%。尾叶桉在部分隔离下的生长情况要好于完全隔离处理,其中生物量的差异达到了显著水平($P < 0.05$),在土壤标记和叶片标记情况下分别增加了

59.4%和221.6%。相反,黑木相思在完全隔离处理下的生长最好,与无隔离处理下的黑木相思相比,土壤标记下的黑木相思苗高、地径以及生物量分别增加了44.9%,43.8%和75.1%,叶片标记下的分别增加了50.2%,31.9%和50.5%。完全隔离下的黑木相思,在苗高、生物量方面亦显著高于部分隔离

处理($P < 0.05$),在土壤标记上分别增加了28.9%和56.8%,在叶片标记上分别增加了138.1%和86.8%。部分隔离处理的黑木相思在土壤标记下,其苗高、地径和生物量要显著高于无隔离处理($P < 0.05$),分别增加了40.9%,77.8%和73.0%。

表2 不同根系隔离处理下尾叶桉-黑木相思的生长指标及全N

处理	尾叶桉			黑木相思		
	苗高/cm	地径/mm	全N/(mg·g ⁻¹)	苗高/cm	地径/mm	全N/(mg·g ⁻¹)
土壤标记						
根系完全隔离	59.3 ± 4.9 b,y	6.5 ± 0.4 b,x	10.0 ± 0.7 a,y	79.0 ± 8.3 a,x	4.8 ± 0.4 a,y	13.3 ± 1.1 ab,x
根系部分隔离	65.5 ± 1.3 ab,x	6.5 ± 0.9 b,x	10.4 ± 1.2 a,y	61.3 ± 6.1 b,x	4.8 ± 0.6 a,y	13.9 ± 0.5 a,x
根系无隔离	72.0 ± 4.9 a,x	7.7 ± 0.2 a,x	10.0 ± 0.4 a,y	43.5 ± 5.2 c,y	2.7 ± 0.3 b,y	12.4 ± 0.7 b,x
叶片标记						
根系完全隔离	49.3 ± 5.1 b,y	5.5 ± 0.3 b,x	10.4 ± 1.7 a,y	89.3 ± 7.5 a,x	4.7 ± 0.3 a,y	14.5 ± 0.7 a,x
根系部分隔离	72.0 ± 5.2 a,x	8.3 ± 1.5 a,x	9.8 ± 0.7 a,y	37.5 ± 2.1 b,y	2.7 ± 0.2 c,y	12.9 ± 0.7 b,x
根系无隔离	75.3 ± 9.7 a,x	7.4 ± 1.0 a,x	9.6 ± 0.7 a,y	44.5 ± 7.2 b,y	3.2 ± 0.3 b,y	13.1 ± 0.4 b,x



注:(a)土壤标记;(b)叶片标记。每柱上面或下面的不同字母分别表示各标记方法内尾叶桉(A, B, C)或黑木相思(a, b, c)在不同隔离处理之间,或同一处理中2种植物之间(x, y)差异显著($P < 0.05$)。

图1 不同根系隔离处理下尾叶桉、黑木相思幼苗生物量

2.3 不同隔离处理下尾叶桉-黑木相思全N、¹⁵N原子百分超及¹⁵N含量的比较

从表2发现,在土壤或叶片标记方法下,各种根系隔离处理对尾叶桉的全N浓度影响不明显,处理间的差异不显著;黑木相思在土壤标记下,其根系部分隔离处理的全N浓度要显著高于无隔离处理($P < 0.05$),增加幅度为13.1%,而叶片标记下的黑木相思全N浓度在完全隔离处理下要显著高于部分隔离、无隔离处理,增加幅度分别为12.8%和10.7%。

各处理下的苗木¹⁵N原子百分超及¹⁵N含量见表3。无论是在土壤标记或叶片标记下的尾叶桉,其在无隔离的处理下的根、茎、叶各部¹⁵N原子百分超都要显著高于完全隔离处理($P < 0.05$)。黑木相思在土壤标记下,其完全隔离处理、部分隔离处理下植物各部的¹⁵N原子百分超要显著高于无隔离处理

($P < 0.05$);相反,黑木相思在叶片标记后,其在完全隔离处理下的各部¹⁵N原子百分超要显著低于部分隔离、无隔离处理($P < 0.05$)。在2种标记方法下,除了土壤标记的无隔离处理外,其余各种根系隔离处理的黑木相思¹⁵N原子百分超都要显著高于同一处理下的尾叶桉($P < 0.05$)。

尾叶桉在2种标记方法下,其根系无隔离、部分隔离处理下的总¹⁵N含量显著高于完全隔离处理($P < 0.05$)。黑木相思在土壤标记下,其在完全隔离、部分隔离时总的¹⁵N含量要显著高于无隔离处理($P < 0.05$);而在叶片标记情况下,完全隔离处理下的黑木相思总¹⁵N含量却显著低于其部分隔离、无隔离处理($P < 0.05$)。无论在何种标记或根系隔离处理下,黑木相思的总¹⁵N含量始终显著高于同一处理的尾叶桉($P < 0.05$)。

2.4 根系隔离对苗木间N传递率、传递量的影响

不同根系隔离处理间的N传递率和传递量差异显著($P < 0.05$)。从图2可看出:随着根系隔离的减少,黑木相思往尾叶桉N传递率、传递量亦逐渐提高;除叶片标记的部分隔离处理与无隔离处理间的N传递率差异不显著外,其余根系隔离减少处理的N传递率、传递量都显著提高($P < 0.05$)。

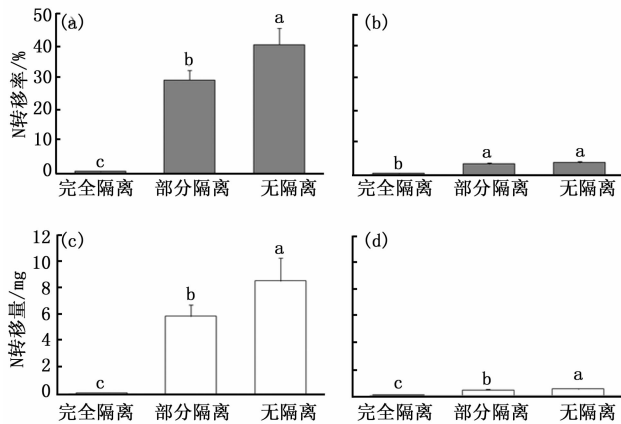
在土壤标记下,各根系处理的N传递率分别是完全隔离为0.74%,部分隔离为29.39%,无隔离为40.54%,依次提高了39.7和1.38倍;N传递量分别是完全隔离为0.10 mg,部分隔离为5.85 mg,无隔离为8.52 mg,依次提高了58.5和1.46倍。

在叶片标记下,各根系处理的 N 传递率分别是完全隔离为 0.33%,部分隔离为 3.21%,无隔离为 3.65%,依次提高了 9.7 和 1.1 倍;N 传递量分别是

完全隔离为 0.05 mg,部分隔离为 0.43 mg,无隔离为 0.49 mg,依次提高了 8.6 和 1.1 倍。

表 3 不同根系隔离处理下尾叶桉-黑木相思原子百分超及¹⁵N 含量

处理	尾叶桉				黑木相思			
	¹⁵ N 原子百分超/%			总 ¹⁵ N 含量/ mg	¹⁵ N 原子百分超/%			总 ¹⁵ N 含量/ mg
	叶	茎	根		叶	茎	根	
土壤标记								
根系完全隔离	0.000 ± 0.000 c,y	0.001 ± 0.000 b,y	0.018 ± 0.002 c,y	0.012 ± 0.001 b,y	0.438 ± 0.022 a,x	0.450 ± 0.008 a,x	0.450 ± 0.028 a,x	1.650 ± 0.115 a,x
根系部分隔离	0.304 ± 0.019 a,y	0.197 ± 0.033 a,y	0.212 ± 0.068 b,y	0.715 ± 0.101 a,y	0.394 ± 0.045 a,x	0.518 ± 0.075 a,x	0.488 ± 0.026 a,x	1.712 ± 0.028 a,x
根系无隔离	0.222 ± 0.029 b,x	0.191 ± 0.029 a,x	0.305 ± 0.079 a,x	0.627 ± 0.096 a,y	0.269 ± 0.090 b,x	0.241 ± 0.044 b,x	0.299 ± 0.075 b,x	0.920 ± 0.112 b,x
叶片标记								
根系完全隔离	0.000 ± 0.000 b,y	0.000 ± 0.000 b,y	0.001 ± 0.000 b,y	0.000 ± 0.000 b,y	0.137 ± 0.005 b,x	0.035 ± 0.004 b,x	0.036 ± 0.004 b,x	0.033 ± 0.001 b,x
根系部分隔离	0.008 ± 0.000 a,y	0.012 ± 0.003 a,y	0.001 ± 0.000 b,y	0.002 ± 0.000 a,y	0.229 ± 0.015 a,x	0.103 ± 0.032 a,x	0.105 ± 0.029 a,x	0.058 ± 0.006 a,x
根系无隔离	0.008 ± 0.001 a,y	0.009 ± 0.001 a,y	0.015 ± 0.002 a,y	0.003 ± 0.000 a,y	0.253 ± 0.039 a,x	0.075 ± 0.012 a,x	0.145 ± 0.008 a,x	0.065 ± 0.007 a,x



注:(a) (c)为土壤标记;(b) (d)为叶片标记。

图 2 不同根系隔离处理下从黑木相思传递至尾叶桉的 N 传递率和传递量

3 结论与讨论

N 素对植物的生长、发育尤为重要^[4]。植物获取 N 素主要途径是从土壤中吸收,而豆科植物还能通过固氮作用获得所需的 N 源^[17]。越来越多的研究证明了植物可以通过 N 素传递从邻近植物获得所需的 N 素^[3-4],促使生态系统的养分平衡。植物间的 N 素传递方式可分为直接和间接两类^[18],前者主要通过菌丝联网、寄生吸盘等将植物紧密连接起来,持续地将植物间的 N 素传递^[3,6];而间接传递则是通过植物根系所释放的分泌物,或残留在土壤的衰

老组织等,以土壤渗透的方式将含 N 物质传递至相邻植物^[4,19]。

本研究证实了尾叶桉与黑木相思间存在着明显的 N 素传递现象,从黑木相思传递至尾叶桉的 N 素会随着根系隔离的减少而显著提高(图 2),这主要是尾叶桉的根系能延伸扩展至相邻黑木相思下的土壤,竞争吸收了黑木相思的¹⁵N 养分。而本研究采用的¹⁵N 叶片标记方法,仅在黑木相思叶片标记¹⁵N 的情况下,仍能在其土壤、相邻的尾叶桉检测到较高的¹⁵N 原子丰度,证明了黑木相思能通过根系分泌物将¹⁵N 物质渗透至土壤,间接的将 N 素传递至尾叶桉。研究中还发现 2 种植物在根系完全隔离的条件下,依然存在着极少量的 N 素传递,这可能与在栽培过程中,夹杂着¹⁵N 土壤的水分溅到相邻植物土壤,或是¹⁵N 挥发过程中被尾叶桉叶片吸收等原因有关。有报道已证实了挥发的¹⁵N 氨态物质可被相邻植物吸收^[20]。

桉树-相思混交是一种常见而有效的培育模式,其混交林的生产量往往要大于各自的纯林^[1,7],主要原因是:一方面,相思能普遍与土壤的根瘤菌共生固 N,其高含 N 量的衰老、腐烂组织可通过土壤渗透为相邻的桉树提供充足的 N 源;另一方面,相思可通过固 N 作用为自身提供充足的 N 源,减少对于土壤 N 源的吸收,产生了 N 素节约效应,从而为相邻的桉树提供更丰富的土壤养分。此外,本研究中发

现尾叶桉的生长速度要显著高于黑木相思,并随着根系隔离的减少,尾叶桉通过其强大的养分吸收能力,抑制了黑木相思的生长(图1),在今后造林实践中必须考虑到树种间生长差异的因素。

近期已有相关的报道了桉树与固N植物降香黄檀混交林的土壤情况,研究发现,与纯林相比,混交林的土壤有机碳含量、铵态N、硝态N、总N等指标均有不同程度的提高,且混交林的细菌生物量显著增加^[21];此外,混交林的土壤异养呼吸对总呼吸的贡献率显著高于自养呼吸对总呼吸的贡献率^[22],表明桉树-固N植物的混交林较纯林更能改善土壤养分状况,维持更丰富的微生物多样性。本研究发现桉树-黑木相思的混交模式具有潜在的可行性,此模式既能生产一种短期获得纸浆材,又能长期获得珍贵板材的经营效果,还可维持土壤肥力,促进桉树人工林的可持续发展。然而,本研究的整个过程均在环境稳定的温室内进行,试验环境与田间环境存在巨大的差异。因此,此混交种植模式仍需通过田间试验进行验证和摸索,如混交的株行距、施肥浓度、间伐周期等,亟待为桉树-相思的混交模式提供一种以短养长的创新树种搭配。

参考文献:

- [1] Forrester D I, Bauhus J, Cowie A L, *et al.* Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: A review[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233(2-3): 211-230.
- [2] Moyer-Henry K A, Burton J W, Israel D W, *et al.* Nitrogen transfer between plants: a ¹⁵N natural abundance study with crop and weed species[J]. *Plant and Soil*, 2006, 282(1-2): 7-20.
- [3] He X, Xu M, Qiu G Y, *et al.* Use of ¹⁵N stable isotope to quantify nitrogen transfer between mycorrhizal plants[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2009, 2(3): 107-118.
- [4] Høgh-Jensen H. The nitrogen transfer between plants: An important but difficult flux to quantify[J]. *Plant and Soil*, 2006, 282(1): 1-5.
- [5] Hobbie E A, Höglberg P. Nitrogen isotopes link mycorrhizal fungi and plants to nitrogen dynamics[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(2): 367-382.
- [6] Lu J K, Kang L H, Sprent J I, *et al.* Two-way transfer of nitrogen between *Dalbergia odorifera* and its hemiparasite *Santalum album* is enhanced when the host is effectively nodulated and fixing nitrogen

- [J]. *Tree Physiology*, 2013, 33(5): 464-474.
- [7] Forrester D I, Schortemeyer M, Stock W D, *et al.* Assessing nitrogen fixation in mixed-and single-species plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* [J]. *Tree physiology*, 2007, 27(9): 1319-1328.
- [8] 黄宇,冯宗炜,汪思龙,等. 杉木与固氮和非固氮树种混交对林地土壤质量和土壤水化学的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(10): 2192-2198.
- [9] 杨曾奖,陈元,徐大平,等. 桉树与豆科植物混交种植对土壤速效养分的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(7): 725-730.
- [10] 白嘉雨. 中国热带地区桉属树种的遗传改良回顾[M]//洪菊生,王豁然. 澳大利亚阔叶树研究. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [11] 黄志宏,周国逸,张宁南,等. 用典型相关法分析尾叶桉人工林干季土壤水分影响因子[J]. *林业科学*, 2003, 39(5): 10-17.
- [12] 余雪标,徐大平,龙腾,等. 连栽桉树人工林生长特性和树冠结构特征[J]. *林业科学*, 2000, 36(专刊1): 137-142.
- [13] 张宁南,许涵,徐大平,等. 广东省尾叶桉和马占相思人工林下植物多样性动态变化[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(2): 262-268.
- [14] 杨木新. 黑木相思的经济价值及速生丰产栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2007, (9): 226-227.
- [15] 马红. 黑木相思扦插繁殖技术及生根机理研究[D]. 福建农林大学, 2007, 5-6.
- [16] 窦雅静,陆俊锐,康丽华,等. 黑木相思根瘤菌遗传多样性[J]. *微生物学报*, 2012, 52(12): 1439-1448.
- [17] Haynes R J, Goh K M. Ammonium and nitrate nutrition of plants [J]. *Biological Reviews*, 1978, 53(4): 465-510.
- [18] McNeill A M, Wood M. ¹⁵N estimates of nitrogen fixation by white clover (*Trifolium repens* L.) growing in a mixture with ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Plant and Soil*, 1990, 128(2): 265-273.
- [19] Paynel F, Murray P J, Cliquet J B. Root exudates: a pathway for short-term N transfer from clover and ryegrass[J]. *Plant and Soil*, 2001, 229(2): 235-243.
- [20] Frank D A, Evans R D, Tracy B F. The role of ammonia volatilization in controlling the natural ¹⁵N abundance of a grazed grassland [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 68(2): 169-178.
- [21] 黄雪蔓,刘世荣,尤业明. 固氮树种对第二代桉树人工林土壤微生物生物量和结构的影响[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(5): 612-620.
- [22] 黄雪蔓,刘世荣,尤业明. 第二代桉树人工纯林和混交林土壤呼吸及其组分研究[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(5): 575-582.